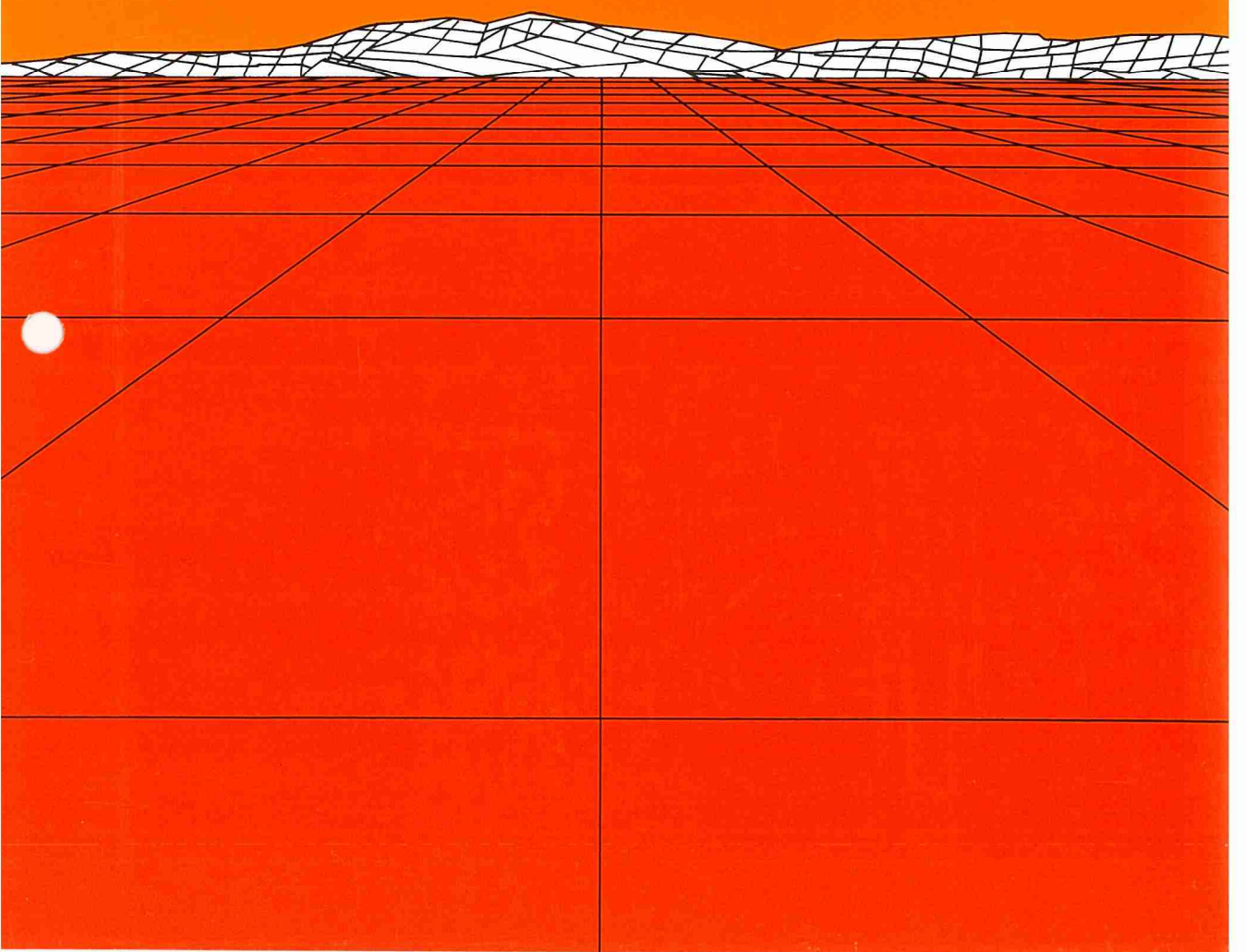


ATRジャーナル

1988秋
第4号

ATR

Advanced Telecommunications Research Institute



巻頭言	1	ATR視聴覚機構研究所	淀 川 英 司
研究動向紹介	2	「図による概念表出の研究」 ATR通信システム研究所	田 中 一 敏
	6	「ニューラルネットワークによる音声認識」 米国カーネギーメロン大学	アレックス ワイベル
	12	「パターン認知メカニズムの研究」 ATR視聴覚機構研究所	乾 敏 郎
	18	「半導体人工超格子」 ATR光電波通信研究所	鎌 田 憲 彦
ATR研究報告	24	外部発表紹介(昭和63年4月～9月)	
ATRの動向	32	テクニカルレポートの販売 受賞者紹介	

アイデアを作り出す技法

ATR視聴覚機構研究所

代表取締役社長 淀川 英 司



ATRでは「電気通信分野における基礎的・独創的研究の推進」ということを第一の基本理念としている。では、具体的にどのようにすれば独創的研究を推進できるのであろうか。独創的研究と言えるためには、まず、そこに何か新しいアイデアがなければならない。普通、アイデアは個人の無意識的・直観的発想によって得られるものであり、その良し悪しは個人の素質と能力で決まると考えられている。もしそうならば、独創的研究を行っていくためには、アイデアの創出について優れた素質と高い能力をもつ研究者を集める以外に方策はない。誰にでも、良いアイデアを作り出せるような一般的方法はないものであろうか。幸いにもそのような方法があるのである。これまで、アイデアの作り方についていくつかの著述がなされている。それらの内容は互いに若干の差異はあるものの、本質的なところでは一致している。次にジェームス・W・ヤングの著書から、そのエッセンスを紹介したい。

アイデア作成の基本原理として、まず次の二つをよく理解することが大切である。第一に、アイデアとは既存の要素の新しい組み合わせであるということである。第二は、既存の要素を新しい組み合わせに導く才能は、事物間の関連性を見つけ出す才能によって高められるということである。

さて、アイデアを作り出す具体的方法を述べることにしよう。アイデア作成のプロセスは次の五つの段階に分けられる。その順序にも重要な意味があり、どの段階にもそれに先行する段階が完了するまでは入ってはならないことに注意する。第一段階は二種類の資料集めである。課題に関する特殊知識と、様々な事象についての一般的知識を豊富にする。第二段階は集めた資料を十分咀嚼することである。あたかもジグソー・パズルを組み合わせるように、各事実をいろいろな視点から眺めてその意味を考え、事実間の関係を探る。このとき、事実をまともに直視しない方がよい。また、この段階でちょっとしたアイデアが出てきたらそれらを紙に書きとめておく。この段階をいかに徹底的に考えぬくまでやるかがアイデア創出の鍵となる。第三段階では、問題を全く放棄する。これは問題を無意識の世界に移すことを意味する。そして、たとえば音楽を聴いたり、映画を見たりして、想像力や感情を刺激する。第四段階はアイデアの誕生である。この段階は何の予告もなく訪れる。最後の第五段階では、現実の有用性に適合させるためにアイデアを具体化し、展開させる。誕生したアイデアを世の中で生かすためには、しまいこまずに外に連れ出し、いろいろな人々の批判を受けなければならない。

以上の技法は意識して用いることにより、磨き鍛えることができる。そして、誰でもアイデアを作り出す能力を高めることができる。私自身もこの技法を意識して用いてきており、既にいくつかのアイデアを得ている。その経験からも、この技法を身につけることは確かに非常に有効であるということが出来る。皆さんも是非この技法を実際の研究課題の解決に適用して欲しい。

図による概念表出の研究

ATR通信システム研究所

通信ソフトウェア研究室

田 中 一 敏

1 はじめに

人類は昔より、人と人との通信に、音声や文字の言葉、身ぶりや手振りの動作、絵等の種々の手段を用いてきましたが、電気通信の世界では、電話に見られるように言語情報を用いることが多いといえます。しかし、技術の進歩により、ファクシミリやパソコン通信のように通信の手段が多様かつ身近になり、意思疎通の手段として、今まで言語情報に比べて取り扱いが遅れてきた2次元の図形・画像情報を通信の手段として扱えるようになってきました。

ATR通信システム研究では、電気通信の分野で、図を人間の思考活動、意思疎通の手段として、活用していくことが重要だと考え、それを実現するために必要な基本技術の確立を目指して研究を進めています。

2 概念図と計算機による支援

図には、一目で全体がつかめる、いろいろな関係が表現しやすい、考えをまとめる時の下書きとしてよい、等の特徴を持っています。しかし、図を作成したり、修正したりするのが面倒です。逆に、言語は表出が容易であり、厳密な記述が可能で、書かれてある順に従って読んでいけば、理解が可能となりますが、一目では全体が把握できません。このように、図は人間の知的活動の道具として、言語情報と同様に、また、それと相互に補完し合うものとして、活用されるものといえます〔1、2〕。

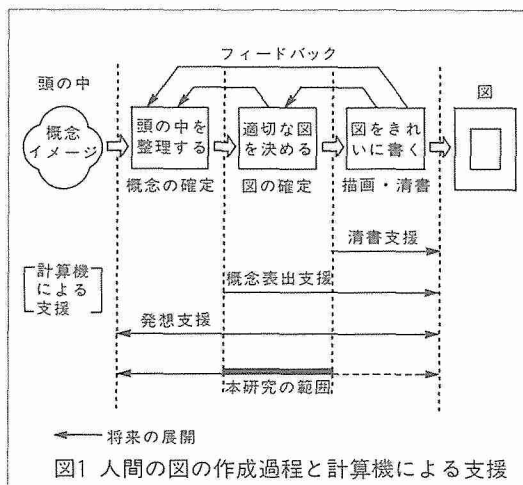
ところで図といっても、機械製図、地図等のような物理的、具体的な図から、分類図、フローチャートのような論理的、抽象的な図まで種々のものがあります。そこで、後者の方、即ち人間が頭の中で考

えた内容(=概念)を図化したもので、意思疎通・思考操作のために用いる図を概念図と呼び、これを研究の対象としています。

人間は、図を書く場合には、まず考えていることを整理し、次にそれにふさわしい図を考え、最後に、紙の上に描画します〔3〕。また、図を用いて頭の中を整理する場合には、種々の図形を試行錯誤的に書いて、その上で内容を明確にして行きます。この作業を計算機の支援により、効率よく行なうことを考えますと、図1に示すように、以下の3つのレベルが考えられます。

- ① 図をきれいに書く(清書支援)
- ② 内容を図の形にする(概念表出支援)
- ③ 内容自体を、図を用いながら明確なものにする(発想支援)

本研究は、頭の中の概念が明確で、図の形態も決まっていた清書するだけのもの(①)ではなく、概念が明確であるが、それに対する適切な図を決定する必要があるもの(②)を、さらに、次の段階とし



て、図を操作する過程で概念を明確にしていくもの(③)を対象とします。そこでは、概念と図との結びつきの解明が最も重要な課題となります。

当面はこの②を中心に研究を進めますがこれを実現する場合、

- (a) 書きたい内容である概念を計算機が正しく理解する。
 - (b) 計算機が、受け取った概念を適切な図に変換する。
 - (c) この図に対して、修正を容易にさせる。
- の3つを確実に実現しなければなりません。

(a)では、人が少ない語数の自然言語で指示した情報から、表出すべき内容を計算機が把握する必要があります。把握した結果を計算機内部で表現したものを意味記述と呼びます。

また(b)については、内容表現する意味記述と具体的な図に対応する形状記述を結びつける変換の仕方を明確にする必要があります。また、図2に示すように、同じ意味記述であっても異なる形状の表現が可能です。

さらに、(c)では、図に対して直接に手を加えたり、変えたい内容を言葉で言うことにより、図を編

集する際に、その図が表わす意味内容に応じて意味の記述、形状の記述の両方が同時に変わる必要があります(図3)。

なお、上の(a)(b)(c)の各過程で、計算機が提供するものが、人の望むものと異なる場合があります。人は、これに対して新たな情報を入力したり、変更を加えたりしながら、図を完成させて行きます。そこで、計算機は、計算機自身が持っている図と図に関する知識の組合せと、人が描画する図のそれとの違いを検出し、それを取り込むことにより、計算機的能力が更に高まります。このような学習機能を持たせて行くこともねらっています。

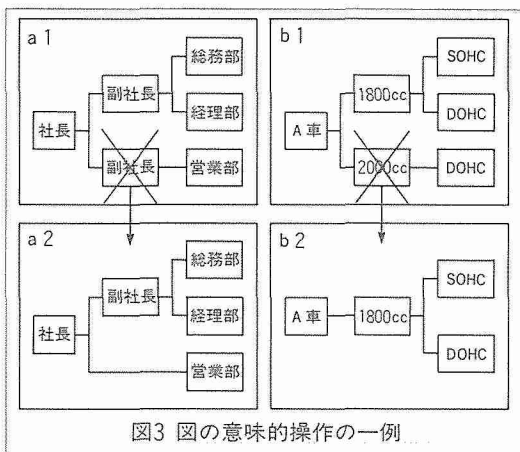


図3 図の意味的操作の一例

3 計算機支援のための図の記述法

前章で述べたように概念図の表出では、図を意味の面と形状の面とに分けて記述し[4]、意味記述から形状記述に変換することが重要です。以下にその内容について述べます。

(1)形状の記述[6]

●具体的に形として表現され、ひとまとまりの意味を持つものを『ノード』、ノード間の関係を形として表現されたものを『アーク』と呼び、それらを用いて記述します。

●さらに、ノード群、アーク群はなんらかの約束ごとによって描画されています。この約束事には、

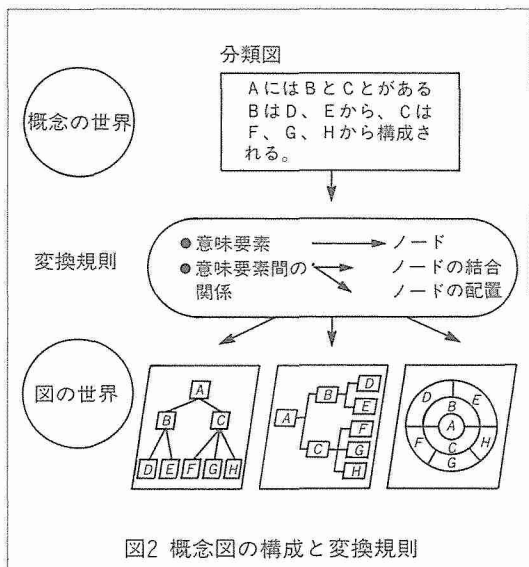


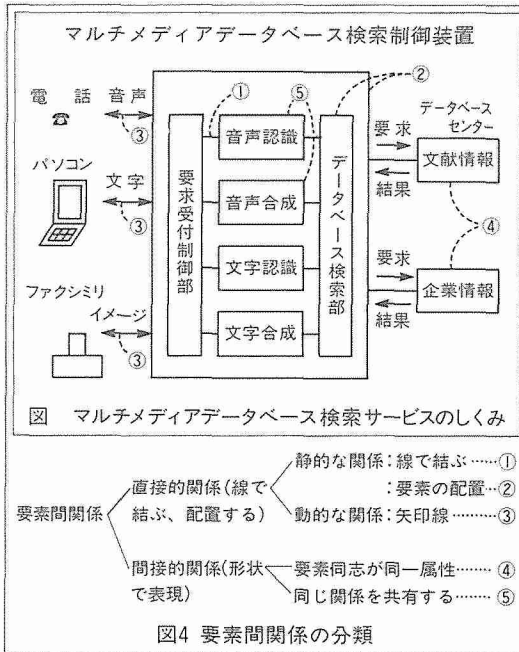
図2 概念図の構成と変換規則

- 複数のノード群を同じ形状とする。
(例：同じ大きさの矩形を書く)
- 複数のノード群を規則的に配列する。
(例：円周上に等間隔に並べる)
- 包含、接合等特殊な位置関係で書く。
(例：入れ子、内接、外接など)
- 複数のアーク群を同じ形状とする。
(例：同じ太さの矢印を書く)
- 複数のアーク群を等間隔に配置する。
(例：等間隔で並行に書く)

等があります〔5〕。これを記述することにより、移動、変形等の繰り返し編集作業を容易に実現することが可能になります。なお、この約束ごとは(3)で述べる意味記述から形状記述への変換によって生成されます。

(2) 意味の記述〔6〕

図の意味記述は基本的に図の形状と独立なものです。本研究が概念を図の形に具体化することを主題としていますので、形状記述に近いものから記述の実現を図っています。具体的には、



●概念の世界ではひとまとまりの意味を担う『意味要素』及びその『要素間の関係』が重要な情報であり、従ってこの2つを用いて意味記述を行う。

●『要素間関係』が描画時の図の形状を決める主要な要因であり、図4に示すような観点で分類・整理を行っています。

また、編集時の形状を決める要因として、他の意味要素が削除されたときに自らの意味要素も消えるか独立に存在するかという意味要素の存在可否の他者依存性を記述します。これにより、図3で述べた処理が可能になります。

(3) 意味の記述から形状の記述への変換

意味記述の意味要素、要素間関係から形状記述のノード、アークに変換する場合、

- ① 要素間関係をどのような構造で記述するか
(要素間関係のうちの直接的関係の処理)
- ② 要素の属性をどのようなノードで表現するか
(要素間関係のうちの間接的関係の処理)

の手順で、形状の記述を得ます。

これを容易にするための一実現方式として、ルール形式で変換処理を記述することを考えています。

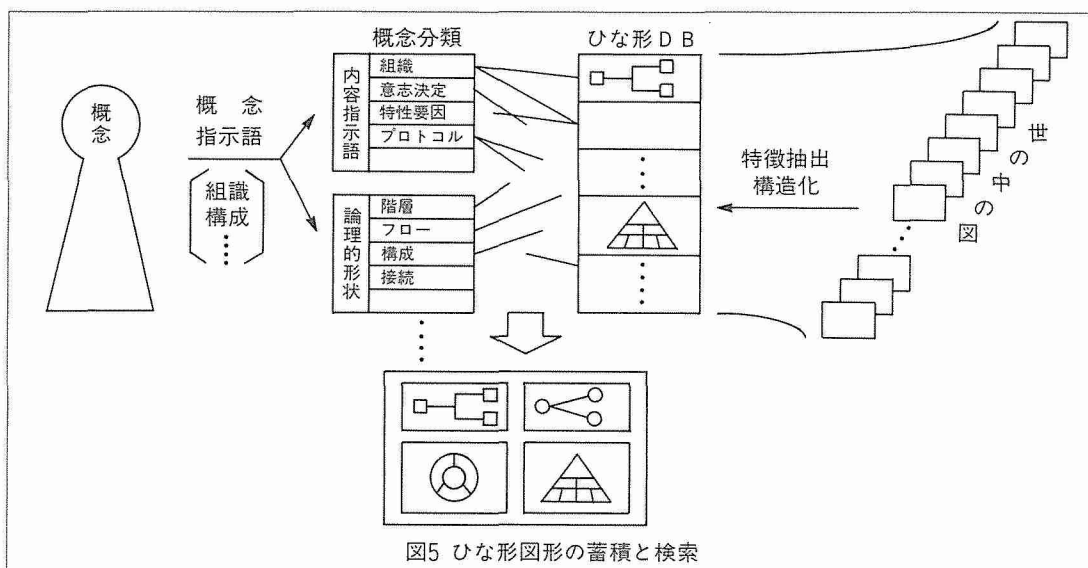
さらに、この(1)～(3)の確立のために以下の検討が必要と考え、鋭意進めているところです。

(a) ひな形の収集、分類

概念とそれから想起される図とをひとまとめにして『ひな形』と呼ぶことにします。これを蓄積することにより、伝えられた概念を適切なひな形の組合せによる図へ変換することが可能になります。現在までに、約1,000枚の図を分析して数十種のひな形の抽出を行なっています。図5にこのひな形の抽出と概念指示語からの選択のイメージを示します。

(b) 言語情報の収集、分類

図の意味記述を行ったり、ひな形を適切に決めるために概念指示語を計算機に伝えたり、作図・編集する際の編集結果が望む結果になったりするためには、それぞれで用いる言語情報の意味を把握する必



必要があります。そこで、意味記述を行うために図中で使用されている用語を、概念指示語のために形状を示す語及び図の表題に使用されている単語を、編集のために形状を修飾する用語を収集・分類しています。

4 おわりに

当研究所で現在進めている概念図の表出についてその概要と研究内容について紹介しました。

現在は、階層構成図を皮切りに、意味記述、形状記述を行い、各種編集操作のメカニズムの実現を図っています。この研究を更に実効あるものにするためには、大量の図形、言語情報、人間の図作成・修正時の振舞いに関する知識が必要であり、収集図形や言語情報のデータベース化と効率のよい検索方式の検討を進めています。

さらに、①学習のための知識ベース、②図形の形状記述における規則性、意味と形状との結びつきの相関等を体系化するものとしての図形文法、③図に対する美観・感性等の問題、④通信ソフトウェアの自動作成における要求仕様概念確定フェーズへの反映・組み込みについて、検討を進めていく予定です。

参考文献

- 〔1〕 出原、吉田、渥美：「図の体系」日科技連 (1986)
- 〔2〕 佐藤、田中、門田、山下：「図の意味的处理へのアプローチ」信学会創立70周年記念全国大会 No.1432 (1987)
- 〔3〕 田中、佐藤、門田、山下：「図の意図と図表現に関する知識について」情処学会全大、No.1P-7 (1987)
- 〔4〕 佐藤、田中、門田、山下：「図のコンセプト記述法および図形情報記述との結合」情処学会全大 No.1P-8 (1987)
- 〔5〕 佐藤、田中、門田、山下：「図の意味的操作を指向する記述と処理について」情処学会全大、No.6 N-9 (1988)
- 〔6〕 佐藤、田中、門田、山下：「概念図作成支援のための図の意味記述」情処学会 知識工学と人工知能研究会、No.59-15 (1988)

ニューラルネットワークによる音声認識

米国カーネギーメロン大学

計算機科学部

アレックス ワイベル*

1 ま え が き

現在使われている電子計算機は、複雑な計算やシステムの制御などの特定分野では、人間の能力をはるかに越えています。しかし、日常、我々が無意識に行っている多くの仕事、例えば、音声の認識、テキストの朗読、車の運転等では、現在のプログラムによる計算機で置き換えられそうにもありません。ここで、このATRジャーナルの表紙のATRのロゴを見てみましょう。ATRのどの文字も明確には書かれておりませんが、誰もが容易に正しくATRと読むことができます。人間はどのようにしてこのような文字を読み取っているのでしょうか。

ATRのロゴを見るときには、目からの刺激のもとに、非常に多くの事実とそれらの間の関係(constraint)が並列的に評価されて、もっともらしい解釈(satisfaction)が無意識に求められているのかもしれない。このような多くの制約を考慮し、もっともらしい解釈を求めること(massive constraint satisfaction)が、すばやく行われていると思われます。実際、人間の脳は、およそ100億個の互いに結合した神経細胞からなっており、大規模並列処理(massive parallelism)が行われています。このようなメカニズムは、現在の計算機とは根本的に異なっています。大規模並列処理のメカニズムに挑戦し、画期的な新しい計算機の動作原理を探究しているのがいわゆるニューロコンピュータの研究です。特に、このような大規模並列網のユニット間の重みを自動的に決定する強力な学習アルゴリズムの出現とスーパーコンピュータの普及によって、ニューロコンピ

ュータの開発が現実味を帯びてきています[1, 2]。これまでは、ほとんどのニューラルネットワークの研究は、小さな問題を取り扱ってきましたが、現在多くの研究者が現実の問題に挑戦し始めています。

ATR自動翻訳電話研究所でも、音声認識の問題を取り上げ、ニューラルネットワークの本格的な研究を昨年度から開始しました。音声波形には、多くの不安定かつ不確実な情報が含まれていますが、人間は様々な知識を無意識に用いて音声波形の意味を理解しています。音声認識の研究は30年もの長い間行われてきていますが、まだ、人間の能力に比べると初歩的な段階です。我々は、新しい音声認識の段階を切り開こうと、大いなる希望を持ってニューラルネットワークに基づく音声認識の研究を進めています。

2 時間遅れ神経回路網[3]

我々は、口や口蓋などの発音に必要な調音器官を動かし、音声を発声します。音声には、時間とともに変化する特徴が含まれています。音声認識を行うには、この特徴の時間軸での動きを適切に捕らえなければなりません。ニューラルネットワークに基づく音声認識を始めるに当たって、まず、時間的に変化するという音声の特徴を表すニューラルネットワークの新しい構成(アーキテクチャー)を考えました。このアーキテクチャーを時間遅れ神経回路網(Time Delay Neural Network以下、TDNNと呼ぶ)と名付けました[3]。具体的には図1に示すようなアーキテクチャーを採用しました。このTDNNは、

*Alex Waibel: 著者は、1987年5月から1988年7月の間、ATR自動翻訳電話研究所音声情報処理研究室において、客員研究員として滞在しました。今回の研究動向紹介は、ATRにおいて行われた研究に関する成果の概要紹介です。

スペクトログラムあるいは声紋と呼ばれる周波数分析した音声の時系列を入力層とします。この入力層として、子音と母音の境界を中心にした15フレーム(150ミリ秒)の周波数パターン(スペクトログラム)を用います。この入力層をもとに、周波数上の局所的な特徴から大局的な特徴へと順次まとめあげ

ていく多層の構成になっています。また、素子間の結合の重みに時間軸の平行移動の制約を付け加えることによって、入力音声の位置のずれや発声速度の変化にも対応できるようにしたアーキテクチャー(Shift Invariant)を採用しました。すなわち、隠れ層1には、入力層の3フレーム(30ミリ秒)の

《解 説》

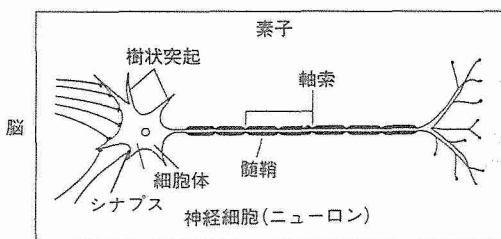
ニューラルネットワークとその音声認識への応用：

神経細胞(ニューロン)は、本体と本体から樹状に突出した樹状突起、1本の長い繊維組織からなる軸索から構成されています。軸索の先端はシナプスと呼ばれ、ここで他の神経細胞に結合します。シナプス結合を通して樹状突起に入力された他の神経細胞からの刺激(信号)は、刺激の重み付け等単純な処理の後、軸索を経由して次の神経細胞に伝達されます。

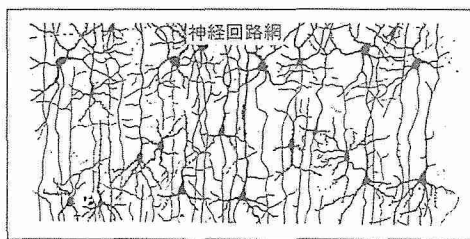
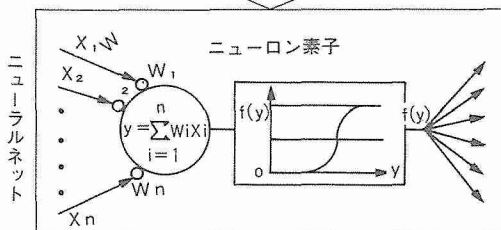
人間の脳では、このような神経細胞が約100億個あり、これらがたがいに複雑に結合しあいネットワークを形成しています。これをニューラルネットワーク(神経回路網)といいます。このネットワークは学習等によってさらに複雑に成長しますが、使われないものは退化する等柔軟性を持っています。

ニューラルネットワークの持つ情報処理機能は、ネットワークの形態や複雑な結合の仕方にあると考えられています。ネットワーク上では必要な機能を記憶した神経細胞だけが機能し、不必要な神経細胞は抑制して処理するため処理速度が速くなります。このシステムの働きを解明して、工学的に応用することがニューラルネットワークの研究の狙いです。

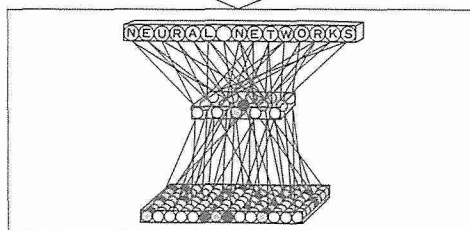
このような機能をコンピュータ上でモデル化したものに、音声認識に用いられたニューラルネットワークがあります。ここでは、入力層から出力層までの4つの層の間にネットワークを張り、入力した音声信号の特徴に対して刺激を受ける素子が機能すると、この素子と重み付け(結合の度合いの強さ)をした次の層の素子に音声信号の特徴を強調した信号を伝達し、さらに次の層に伝達して特徴抽出を行うという方法で音声信号の認識を行っています。



モデル化



モデル化



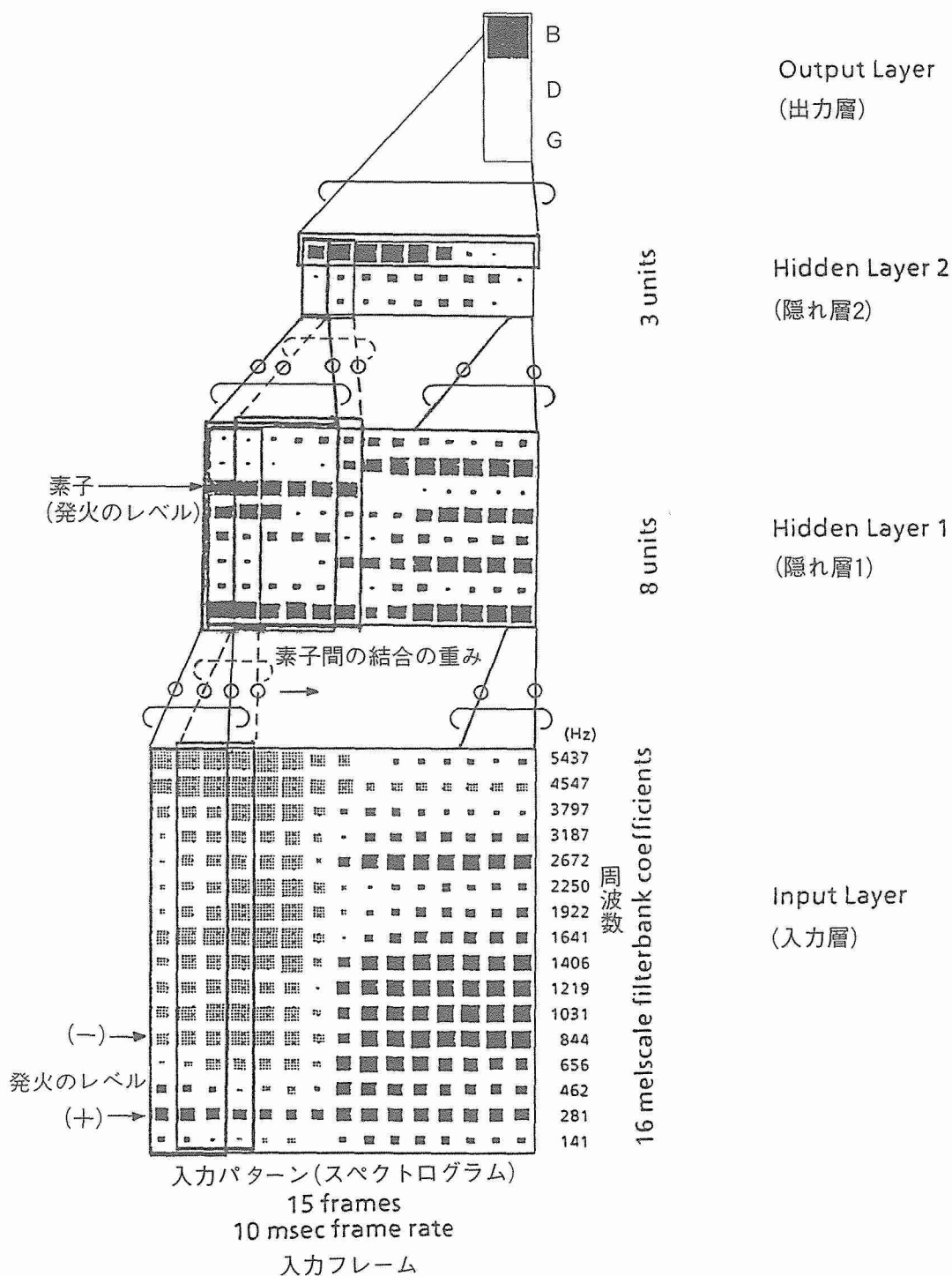


図1. 時間遅れニューラルネットワーク(TDNN)のアーキテクチャー

局所的特徴を検出する特徴検出器(素子)が並んでいます。同様に、隠れ層2には、隠れ層1の5フレーム(50ミリ秒)のより大局的な特徴を検出する特徴検出器が並んでいます。このアーキテクチャーが3フレームごとの周波数パターンを順次、1フレームの時間の遅れを持たせてニューラルネットワークに送り込むことと同じことになることから、時間遅れ神経回路網(TDNN)と呼びます。

このTDNNの高い能力を実証するために、小規模であるけれども難しい音韻認識として、有声破裂音/B, D, G/の識別を取り上げ、識別実験を行いました。図1は、入力音韻/B/を正しく認識したときのTDNNの素子の発火の強さを表しています。一番上の層は、/B, D, G/の認識結果を表す素子で、この例では/B/の素子が強く発火して、入力パターンが/B/であることを示しています。

実験では、まず、ATRで作成された大規模単語音声データベースから/B, D, G/に対応する音声区間を切り出しました。素子(Unit)の間の結合の強さを表す重みの学習を、逆伝搬法(Back-Propagation Algorithm)[1]で行いました。逆伝搬法による学習では、図1のTDNNにおいて、/B, D, G/の音声区間を入力パターンとし、/B, D, G/のそれぞれの音韻に対応する出力層の素子の発火レベルを1と0に設定します。例えば、入力された音韻が/B/のときには出力層の/B/の素子の発火レベルを1にして、残りの/D/と/G/の発火レベルを0にします。この出力層のこれらの値は理想的な出力値であり、これらを教師信号と呼ぶことにします。逆伝搬法では、この教師信号と、入力パターンから計算した発火レベルとの差を検出して、この差を逆に出力層から隠れ層へ伝搬して、差が小さくなるように素子間の結合の重

みを調整するアルゴリズムです。学習サンプル全体を繰り返し入力して、差が小さくなるように素子間の結合の重みを徐々に調整します。このようにしてニューラルネットワークは、重みの調整により/B, D, G/の識別に重要な特徴を発見します。

このTDNNの認識性能を評価するため、3人の発声者の大規模単語音声データベースを用いて、認識用の音韻サンプルをTDNNに入力しました。この音韻識別実験の結果を話者別に表1に示します。表1には同じデータベースに対する隠れマルコフモデル(Hidden Markov Model)*1による結果も比較のために示しています。隠れマルコフモデルは、現在の音声認識で最も強力とされている統計的なアルゴリズムです。いずれの話者に対してもTDNNは、隠れマルコフモデルよりもはるかに高い識別率を示していることが分かります。

表1 TDNNと隠れマルコフモデル(HMM)の/B, D, G/識別率の比較実験結果

発声者	TDNNによる 音韻識別率	HMMによる 音韻識別率
A	98.8%	92.9%
B	99.1%	97.2%
C	97.5%	90.9%

3 時間遅れ神経回路網の性質[3]

/B, D, G/識別のTDNNでも、約400個の素子、6000個の素子間の結合の重みを持ち、その重みの自由度が約500の、かなり大規模なニューラルネットワークです。我々はこのTDNNの動作を解析し、いつか

*1 隠れマルコフモデルは、音韻のモデルを連結することによって、単語、文節、文章の認識にまで容易に拡張できる強力な統計的手法です。TDNNは、/B, D, G/の識別という限られた局面で隠れマルコフモデルより優れた結果を達成しましたが、今後、TDNNを隠れマルコフモデルと同様に、単語、文節、文章の認識まで拡張するアルゴリズムを研究する必要があります。

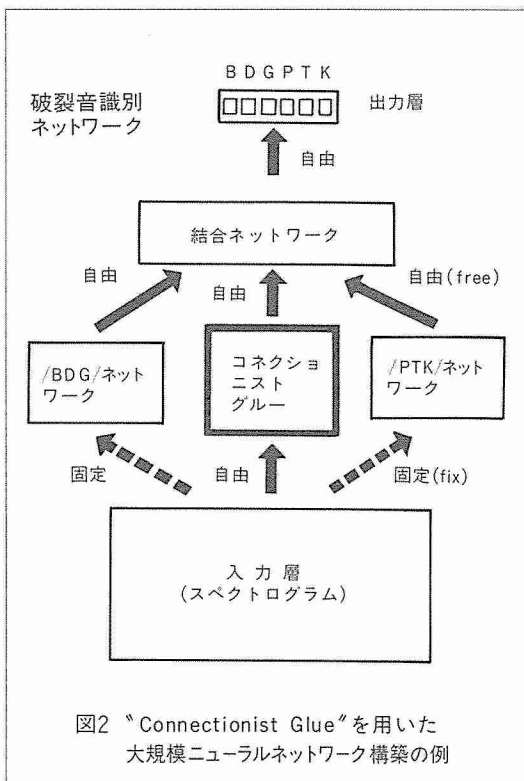
の非常に興味深い性質を見つけました。まず、逆伝搬法による学習を、位置ずれ不変 (Shift Invariant) のTDNNのアーキテクチャー上で行うため、700余りの比較的少ない音韻のサンプルから、安定な識別に有効な特徴が自動的に得られました。この学習により、入力音韻の時間軸上の位置が多少ずれても正しく認識できることが確かめられました。また、周波数上の局所的な特徴から大局的な特徴へと順次まとめあげていく構成が、音声の発声速度や音韻環境による変化にも強い特徴を見つけ出していることも分かりました。さらに、音韻環境等による音韻の異なる特徴 (例えば、普通の/G/と鼻音化した/G/) に対しても、異なるネットワークの表現を実現していました。そのうえ、ネットワークのいくつかの素子は、言語音声学で知られている/B, D, G/の弁別特徴と対応していました。これらの事柄は、TDNNが音声の認識にたいそう適したアーキテクチャーであることを示唆しています。

4 大規模時間遅れ神経回路網の構成への挑戦〔4〕

これらのTDNNの有望な性質に勇気づけられ、日本語の全部の子音の識別問題の研究を開始しました。/B, D, G/の出力素子の代わりに、20余りの子音の出力素子を設け、それに伴って中間層も6,7倍に素子を増やすことを考えてみます。このようなTDNNを逆伝搬法で学習させるには、ミニスーパー計算機でも膨大な計算時間がかかることが予想され、実際上不可能です。この膨大な計算時間に打ち勝つために、/B, D, G/ネットワークのように音韻のクラスターごとのネットワークを逆伝搬法であらかじめ作成しておき、これをもとに全音韻の識別ネットワークを構成することを考えました。図2に、“Connectionist Glue”と呼んでいる手法による/B, D, G/ネットワークと/P, T, K/ネットワークとから、/B, D, G, P, T, K/破裂音識別ネットワークを構成するアーキテクチャーを示します。“Glue”とは、「のり」とい

う意味です。第一隠れ層として/B, D, G/ネットワークと/P, T, K/ネットワークをそのまま用いて、入力パターンとの結合の強さの重みも同じ値をコピーして用います。さらに、/B, D, G/クラスターと/P, T, K/クラスターを識別できるような特徴を自動的に見つけ出すことを目的にして、“Connectionist Glue”と呼んでいる隠れ層を付加します。このような構成にして、図2でFree(自由)としている重みを逆伝搬法で学習させます。これにより、98.4%の音韻識別率が得られました。その識別率は、すべての重みを自由にして、逆伝搬法で学習させたときの識別率と同じでした。勿論、逆伝搬法での学習に要する時間は、“Connectionist Glue”の方が数分の1でした。さらに、全ての重みを自由にして学習を進めると、音韻識別率が98.6%まで向上しました。

同様のアプローチで全子音/(B,D,G),(P,T,K),(M,N,NN),(S,SH,H,Z),(CH,TS),(R,W,Y)/の識別ネ



ットワークの構成を試みました。この実験では、括弧で示した音韻クラスターの識別ネットワークと上記のクラスター間の識別ネットワークを用いました。まず、入力パターンと第一隠れ層の重みを固定して逆伝搬法での学習を行い、95.0%の音韻識別率が得られました。さらに、すべての重みを自由にして学習を進め、95.9%の音韻識別率まで向上しました。この音韻識別率は、ATRで改良された隠れマルコフモデル〔5〕の音韻識別率92.7%よりも優れています。さらに、高い音韻識別率を少ない学習時間で達成できるアルゴリズムの検討を進めています。

5 む す び

時間遅れ神経回路網(TDNN)という音韻識別用のニューラルネットワークの新しいアーキテクチャを考えだし、逆伝搬法による学習で非常に高い音韻識別率を達成できることを実験で確かめました。今後、このTDNNの適用分野を単語音声認識、連続音声認識、不特定話者音声認識へと広げて行くとともに、ニューラルネットワークのニューロコンピュータとしてのアーキテクチャの検討も進めて行く予定です。

(訳者：鹿野清宏)

参 考 文 献

- 〔1〕 D. E. Rumelher, J. McClelland, "Parallel Distributed Processing; Explorations in the Microstructure of Cognition", Volume I and II, MIT Press, Cambridge, MA (1986)
- 〔2〕 R. P. Lippmann, "An Introduction to Computing with Neural Nets", IEEE ASSP Magazine, 4-22 (1987-4)
- 〔3〕 A. Waibel, T. Hanazawa, K. Hinton, K. Shikano, K. Lang, "Phoneme Recognition Using Time-Delay Neural Networks", ATR Technical Report TR-1-0006 (1987-10)
- 〔4〕 A. Waibel, H. Sawai, K. Shikano, "Phoneme Recognition by Modular Construction of Time-Delay Neural Networks", 日本音響学会講演論文集, 2-P-12 (1988-10)
- 〔5〕 花沢、川端、鹿野：「HMM音韻認識におけるセパレートベクトル量子化の検討」日本音響学会講演論文集, 2-P-21 (1988-10)

パターン認知メカニズムの研究

ATR 視聴覚機構研究所

認知機構研究室

乾 敏 郎

最近の情報通信機器の進歩は目ざましいものがあります。そして高度な知的機能を通信機器に持たせようとする要求はますます高まるに違いありません。知的機能とはまさに人間の持つ高度な情報処理機能であり、このような機能を持たせるためには人間をはじめとする生物の柔軟な情報処理様式を通信という立場から明らかにする必要があります。

知的機能のなかで最も重要なのは言うまでもなくパターン認識機能です。人間はきわめて高度なパターン認識の能力をもっています。工学の分野においても長年パターン認識の技術開発が行われてきました。しかし、その能力は人間のそれと比較するとまだまだ未熟であると思われる。私たちの高度なパターン認識機能の特徴として、認識対象の特徴をうまく捉えられるということが挙げられます。言い替えば、対象の構造を脳内で表現する能力が極めて高いと言えます。私たちは、このような人間のパターン認知機構、とりわけ視覚情報の脳内表現のしくみに関してモデル化を行うと同時にそれを工学的に応用しようとしています。

1 特徴点検出、補間、群化・分節機能の研究

私たちが対象の形状を把握するとき、さまざまな能動的機能を働かせています。形状を把握するときその特徴のある点に注目することが眼球運動の測定

等により、よく知られています。さらに曲線の特徴点は個々の点に注意を向ける以前に並列に処理されていることが示唆されています。一般に曲線の特徴点には、(1)端点(terminating point) (2)交点(intersecting point) (3)間隙(gap) (4)曲率の大きい点(high curvature point)などがあります。これら一見異なるタイプの特徴点に共通の性質は何でしょうか。それは、これらの特徴点においては接線の方が定まりにくいということです。私たちは、このような性質に着目し、心理学や生理学の知見も考慮して、これらの特徴点を並列に検出できるモデルを考えました。図1は、並列計算機によってシミュレーションした結果です。

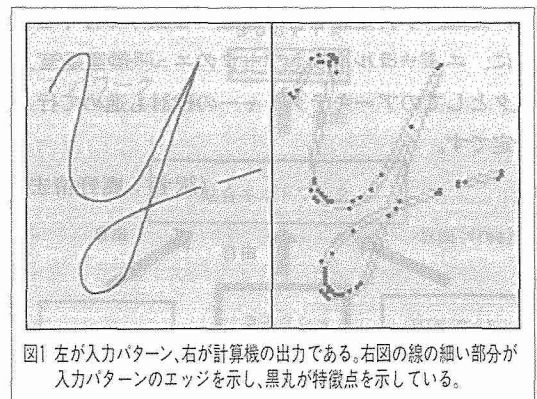


図1 左が入力パターン、右が計算機の出力である。右図の線の細い部分が入力パターンのエッジを示し、黒丸が特徴点を示している。

ところで人間が形状を把握する過程を考えてみると、細かな特徴をすべて検出しているのではなく、

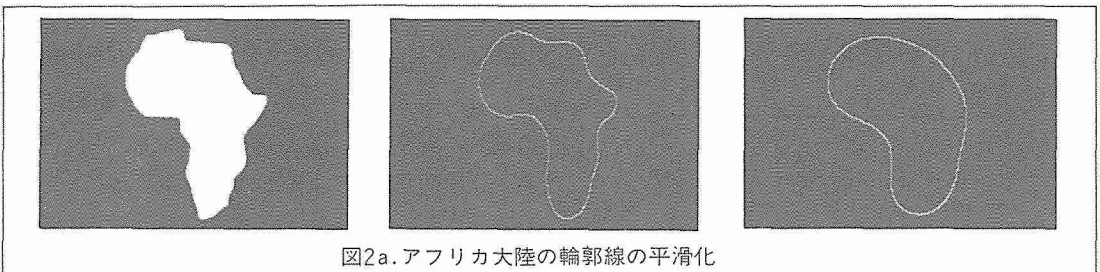


図2a. アフリカ大陸の輪郭線の平滑化

大局的な特徴に注目することがわかります。そこでさらに上述のモデルの性質に加えて輪郭線の平滑化(図2 a)も同時に行うモデルも考えられています(図2 b)。

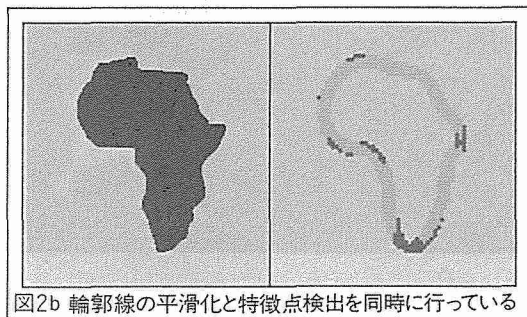


図2b 輪郭線の平滑化と特徴点検出を同時に行っている

つぎに図3のようなパターンを見ますと私たちは頭の中で点列を補間して円を知覚します。一方図4のようなパターンを見ますと私たちは波線と線分が重なったものとして知覚します。このようにパターン全体をその部分に分解する機能を分節とよびます。このような補間や分節機能に関するモデル化をおこなっています。

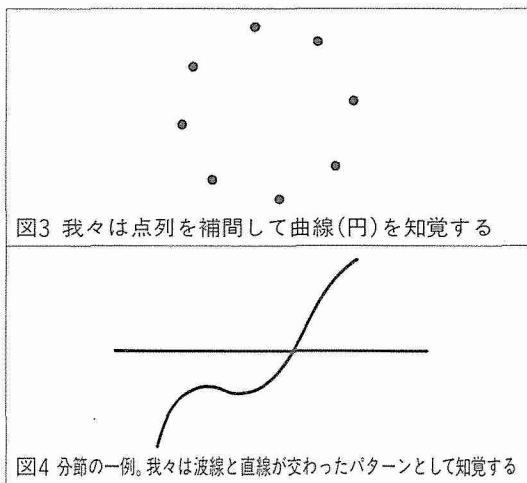


図3 我々は点列を補間して曲線(円)を知覚する

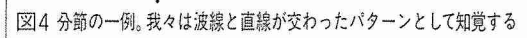


図4 分節の一例。我々は波線と直線が交ったパターンとして知覚する

2 網膜時空間特性の測定と不均一モデル

私たちが車を運転するとき、あちこちに視線を向けながら時々刻々変化する状況を的確に把握しています。また高度な認識を行おうとすると先に述べた

ように対象の重要な構造に注意を集中する必要があります。このような注意 (attention) 機能は人間の高度なパターン認識にとって不可欠のものであることが知られています。注意機能を実現する基本要素として網膜の時空間特性がその中心部から周辺部になるにつれて変化している不均一な構造が挙げられます。従来網膜の時空間特性に関して数多くの研究がなされてきました。私たちは、これまでにない微細な網膜構造を心理物理学の実験によって明らかにしようとしています(図5)。

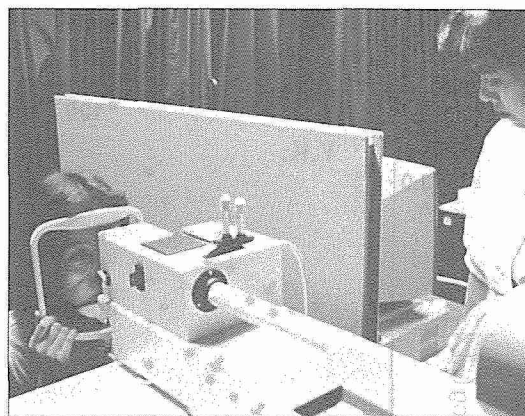


図5 心理物理実験風景

微細構造とは網膜の出力細胞が持つ局所的なフィルタ特性とその密度の空間分布です。このような微細構造を推定するために時間的、空間的な強度分布が正規分布となるよう制御された時空間ガウスパターンをさまざまな大きさで提示する新しい装置を作り実験を行っています(図6)。被験者が光を検出す

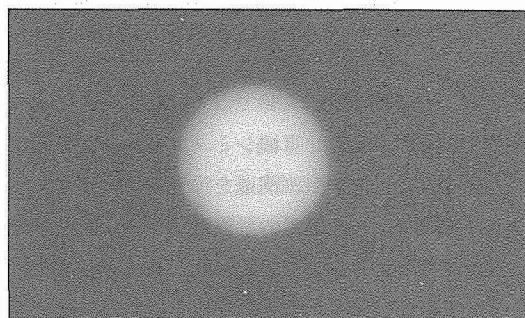


図6 二次元ガウスパターン。時空間ガウスパターンでは、二次元ガウスパターンの輝度をさらに時間的にガウスで変調する。

るのに必要な光エネルギーを測定し、光ガウスパターンの大きさととの関係を調べます。図7はこのようにして測定されたエネルギーと大きさの関係を3種類の提示条件で示しています。光ガウスパターンは時間的にもガウス状に輝度変調されて提示されており、グラフの右端に書かれた数字は、その長さ(2σ 、提示時間)を示しています。時間 σ が小さいとき(2σ が100msec, 400msecのとき)は2つの屈曲点が見られますが、長くなると1つしか見られなくなります。これは、網膜に2つの時空間特性の異なるチャンネル(信号伝達経路)が存在することを意味しています。

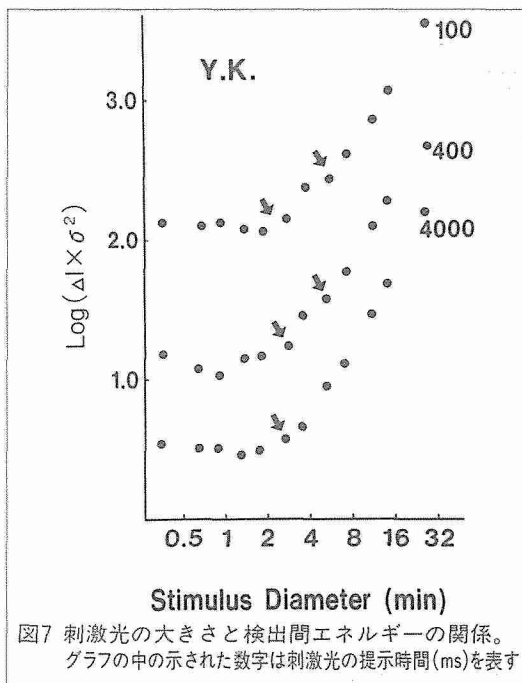


図7 刺激光の大きさと検出間エネルギーの関係。グラフの中の示された数字は刺激光の提示時間(ms)を表す

一方、心理物理学の実験で得られたデータに基づきモデルを作成し、計算機シミュレーションを行うことにより、上述の微細構造を推定しています。しかし、網膜モデルを通常の計算機でシミュレートしようとすると、きわめて計算時間が長くなります。そこで私たちは前述の並列計算機を用いて、モデルのシミュレーションを行っています(図8)。



図8 網膜不均一モデルのシミュレーション。
図左に書かれた同心円は網膜位置を示し、カーソルによって刺激光の位置を指定できる。
この図では中心から視角50分だけずれた位置にスポット光が示されている。
右上に網膜の出力細胞である神経節細胞群の発火パターンが示されている。右下にその断面が示されている。
右の発火パターンからコントラストの変化が強調されて中枢に伝えられていることが理解できる。

3 非剛体の階層的構造記述とその照合方式の研究

近年、各方面で画像・図面・文書などのいわゆる画像データの利用が盛んになってきています。これら大量の画像データを効率よく蓄積し、データベース化しておき応用分野のニーズに応じた形で、データの提供・操作・処理を行う技術を開発することはきわめて重要であると考えられます。一般に、画像データは、通常の文字、数値情報にはみられない次のような性質があります。

- (1) 対象の形・位置・相互関係をすべて表現しなければならない。
- (2) 形・位置・相互関係を考慮し、各種の検索・処理を実行しなければならない。

したがって、画像データを扱う場合、検索・処理を柔軟に、効率よく実行できるような対象の形状表現が重要となります。とくに形状のマッチングに関して、その構造記述の重要性が指摘されています。特に例えば生き物のように非剛体の形状マッチングに

は関節等の情報を用いた階層的構造記述が重要です。私たちは構造を表現する要素として図形のスケルトン（骨格）を用い、これを記号化することにより、さまざまな解像度で、しかも階層間の“関係”記述を含めた階層的構造記述の自動生成を試みています。図9は、らくだのシルエットからその輪郭線を抽出し、輪郭線をいくつかの解像度で平滑化した後得られた骨格を示しています。一つの対象の輪郭線からさまざまな解像度で骨格を求めることにより、対象の構造を様々な水準で捉えることができます。これらの骨格をもとにして得られた階層的構造記述（木表現）を図10に示しました。現在、さまざまな動物で得られた木表現や同じ動物でも異なる姿勢の木表現の照合方式について検討を行っています。

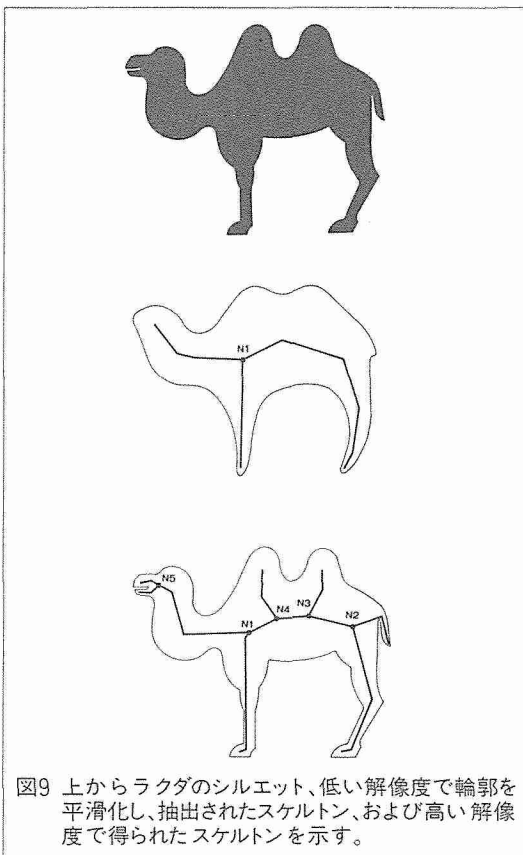


図9 上からラクダのシルエット、低い解像度で輪郭を平滑化し、抽出されたスケルトン、および高い解像度で得られたスケルトンを示す。

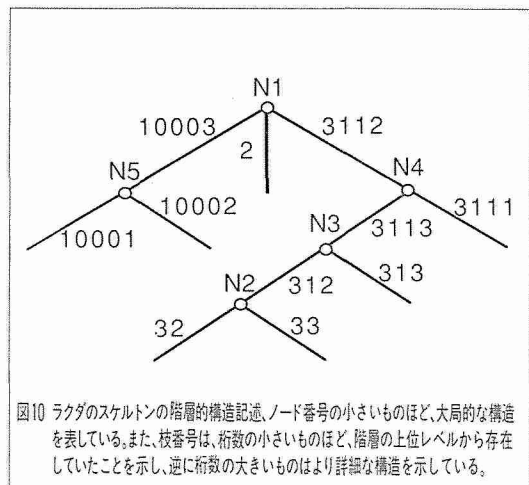


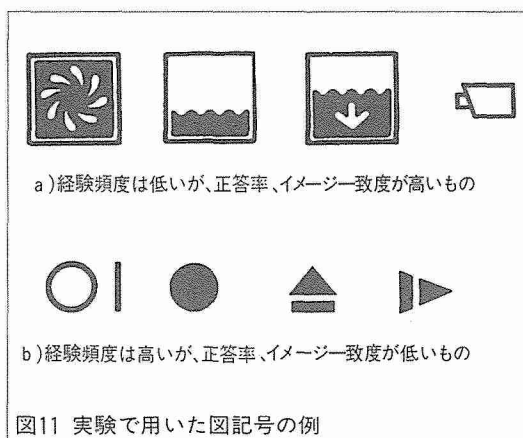
図10 ラクダのスケルトンの階層的構造記述、ノード番号の小さいものほど、大局的な構造を表している。また、枝番号は、桁数の小さいものは、階層の上位レベルから存在していたことを示し、逆に桁数の大きいものはより詳細な構造を示している。

4 画像の抽象化表現に関する研究

従来、コンピュータシステムを用いるには、システム設計者によって設計された文法に則った、数字や文字からなるコマンドを、キーボードを使って入力することが必要でした。アイコンを用いたメニューシステムは、言語に依存することなくメンタルモデル（機械の働きについてユーザが持つモデル）をダイレクトにユーザに提示出来ることから、万国共通のユーザフレンドリなヒューマンインタフェースとして非常に有効であると考えられます。私たちは人間の情報処理プロセスとの親和性に優れた使いやすいアイコンの設計指針を得ることを目的として研究を行っています。

これまでに、日常経験的に学習している図記号を対象にいくつかの心理実験を行い、①イメージ一致度によってある程度正答率の予測が可能であること②具象的内容を表す場合には具象的な図柄で高い正答率が得られること、③抽象的内容を表す場合には表現内容とイメージ一致度の高い図柄で高い正答率が得られること、④評定値が正答率の向上に対してある程度安定な尺度であること等の結果を得ました（図11参照）。

すなわち、アイコン設計の指針として、



- (1) 具象的内容を表すには具象的な図柄がわかり易いこと。
- (2) 抽象的内容を表すには表現内容とイメージ致度の高い図柄がわかり易いこと。

などが示唆されました。これらの検討結果に立脚し現在、具象的な図柄のアイコンを設計する手法について検討を進めつつあります。具体的には、まず多値画像から高品質な輪郭線を抽出する手法について検討し、更にある範疇の複数の線画像の平均的な線画像（プロトタイプ）を生成する手法について検討を進めています。

5 認知地図形成過程の研究

自律走行ロボットの研究が各分野で行われており、実現のためには数多くの問題を解決しなければなりません。その中にロボットが持つべき「地図」の問題があります。通常、ロボットの地図生成過程は、距離センサーやカメラからの入力进行处理して「部分空間」を求める過程と、求めた部分空間を統合化することで「全体地図」を形成する過程に分けられます。しかし、前者の「部分空間把握過程」が研究の中心であり、後者の「全体地図形成過程」に関する研究がきわめて少ないのが現状です。その原因は、全体地図形成のためにどのようなデータを収集し利用すればよいか、どのような過程で全体地図

が形成されるかなど「空間把握過程の本質的な部分」が明確でないためと考えられます。

認知地図は、「個々の状況」とともに「全体的なイメージ」も把握した知識です。したがって、全体的なイメージを利用しながら個々の行動を規定するため、認知地図は、空間の把握に有効な概念と考えられます。しかし、認知地図に関する研究は、形成要因の抽出や統制の困難さや定量的な把握の難しさなどから現象の記述に留まり、工学的応用が難しいのが現状です。そこで、私たちは、形成要因のコントロールが可能な「コンピュータグラフィックス（CG）迷路を用いた実験」から「認知地図形成過程の定量的な解析」を行い、心理学で提唱されている人間の優れた空間認知特性を工学的に応用するため、「認知地図形成過程のモデル化」を行おうとしています。

6 おわりに

私たちは、高度なパターン認識機能の実現に向けて上記のような研究を進めています。群化・分節機能、注意機能、構造記述は、パターン認識機能を実現するのに避けて通れない問題だと考えられます。パターン認識機能の実現は基本的に人間行動のシミュレーションだと言えます。故David Marr(1980 没)は、情報処理研究において計算理論(Computational theory)の重要性を強調しました。計算理論とは、簡単に言えば、情報処理システムの入出力の関数関係を示すものです。計算理論を構築する背景には最適性という考え方があります。人間が行っている情報処理様式はおそらく何等かの意味で最適なものにちがいないと考えてモデル化することは、非常に重要なことだと考えられます。私たちのグループでは、人間の視覚特性を測定すると同時に計算理論の研究も行っています。実験と理論の両面を並行させて進めていくことがパターン認知機構の研究にとって重要なことだと考えています。

参考文献

- [1] 乾 敏郎、可児一孝、三宅 誠：「網膜モデルによるヒトのY細胞受容野密度の推定」電子情報通信学会MEとバイオサイバネティックス研究会資料MBE87-57 (1987)
- [2] 乾 敏郎：「視覚情報処理と神経モデル」bit、20、30-36 (1988)
- [3] Inui, T., Miyake, S., and Kani, K. : "Receptive field density of Y cells estimated by a model of human retina." Proceedings of the First Annual meeting of the International Neural Network Society (1988)
: Neural Networks, vol 1, Supplement 1
- [4] 乾 敏郎：「原始スケッチを生成する神経回路」第10回神経情報科学研究会資料 (1988)
- [5] 乾 敏郎：「時空間ガウスパターンを用いた視覚特性の検討」テレビジョン学会視覚情報研究会資料 (1988)
- [6] Inui, T. : "Properties of human visual memory for block patterns." Biological Cybernetics, 59, 179-188 (1988)
- [7] 松下 博、乾 敏郎：「形状の階層的構造記述の一手法」昭和63年電子情報通信学会春期全国大会講演論文集〔文冊D-1〕, p. 1-134 (1988)
- [8] 松下 博、乾 敏郎：「形状の階層的構造記述の自動生成」昭和63年電子情報通信学会パターン認識・理解研究会資料 Vol.88, No.78, p.65-72 (1988)
- [9] 本郷節之、乾 敏郎：「図記号の認知特性」昭和63年電子情報通信学会春期全国大会講演論文集〔分冊D-2〕, p. 2-13 (1988)
- [10] 本郷節之、乾 敏郎：「アイコンの認知容易性に及ぼす諸要因」人工知能学会研究会資料SIG-HICG (1988)
- [11] 藤井秀夫、本郷節之：「認知地図形成過程のモデル化についての一考察」ATR視聴覚機構研究所テクニカルレポートTR-A-0031 (1988)
- [12] Marr, D. : "Vision-A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information-" W.H.Freeman and Company (1982)
(乾 敏郎、安藤広志訳「ビジョンー視覚の計算理論と脳内表現」産業図書、1987)
- [13] Miyake, S., and Inui, T. : "Neural computation research for vision—simulation on a parallel processing computer—" In : R. Trappl(ed.) Cybernetics and Systems' 88, 1007-1014, Kluwer Academic Publishers.

半導体人工超格子

ATR光電波通信研究所

通信デバイス研究室

鎌田 憲彦

1 まえがき

通信システムを支える半導体光素子技術の発展には目ざましいものがあります。現在全国に光ファイバーの基幹通信回線網が敷設され、その中を毎秒 10^9 個の光信号が情報を運んでいます。光を用いることによって、長い距離を電気信号よりはるかに低損失で伝送することができるのです。地域内、ビル内などのより小規模な光通信システムも増加しています。これら光通信システムの光源や検出器などのキーデバイスとして、半導体光素子は今や無くてはならないものとなっています。

しかしながら私達は、光の持つ本質的な可能性(超高速性、並列性、光結線の非干渉性など)を生かし切っているとはまだまだ言えません。光素子は現状よりもはるかに高速になる可能性を持っています。また元来私達人間が見ているように光信号を「像」として並列処理することができるようになれば、情報処理通信に大きな飛躍がもたらされることは間違いありません。そのためにはある光入力の高さを境にして光の透過率が大きく変化するような非線形動作をする素子—非線形光素子—が必要です。

ATR光電波通信研究所ではこうした光の可能性をさらに生かすために、原子スケールでの成長制御による新材料の開発やカオスの制御・神経回路網の応用などの光情報処理アーキテクチャーの研究と合わせて、半導体人工超格子〔1〕を用いた光素子の研究を進めています。ここではその中から選択ドープ構造による発光の高速・高効率化と、量子井戸のサブバンド間遷移を利用した非線形光素子の可能性について紹介します。

2 半導体人工超格子とは

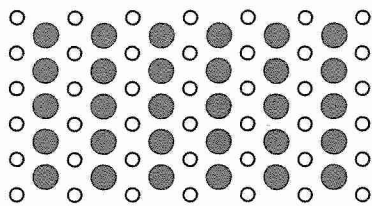
私達の身のまわりにはたくさんの物(物質)があり、これらの物質はそれぞれ固有の性質を持っています。たとえば金や銅は電気や熱を良く伝えますが光(可視光)は通しません。一方ガラスの性質はその反対です。こうした物質固有の性質は何で決まっているのでしょうか。ご存知の通り全ての物質は周期律表にある高々百種類余りの原子からできています。そして物質を構成する原子の「種類」とその「並び方」という二つの要素によって各々の物質の性質が決まっています。

逆に物質固有の性質を変えるには、その物質を構成する原子の種類か、または並べ方を変えれば良いことになります。もし原子を1個1個ピンセットでつまんで望みの位置に置くようなことができれば、たとえ原子の種類は限られていてもその並べ方を無数の組み合わせの中から人間が自由に選べるようになります。それによって今まで自然界には存在しなかった優れた性質を持つ物質を人工的に創造することができるのです。

原子の並べ方の模式図で半導体人工超格子の説明をしましょう。図1の左側は2つの半導体A(たとえばGaAs)と半導体B(たとえばAlAs)の結晶構造を示しています。GaAsはGa(ガリウム)原子とAs(ヒ素)原子が周期aで規則的に並んで結晶格子を作っており、同様にAlAsはAl(アルミニウム)原子とAs原子が周期bで結晶格子を作っています。これに対して図1の右側に示したように、半導体A、B双方の構成原子(Ga, As, Al, As)を一定の順序で積み重ねて作った構造を半導体人工超格子と呼びます。このときエネルギーバンドは半導体A、半導体Bの禁制帯エネ

半導体人工超格子

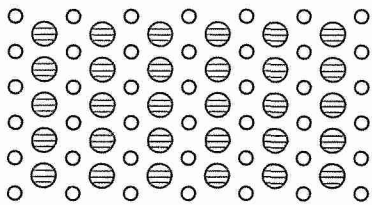
半導体 A (性質 A)



周期 a

禁制帯幅 E_a

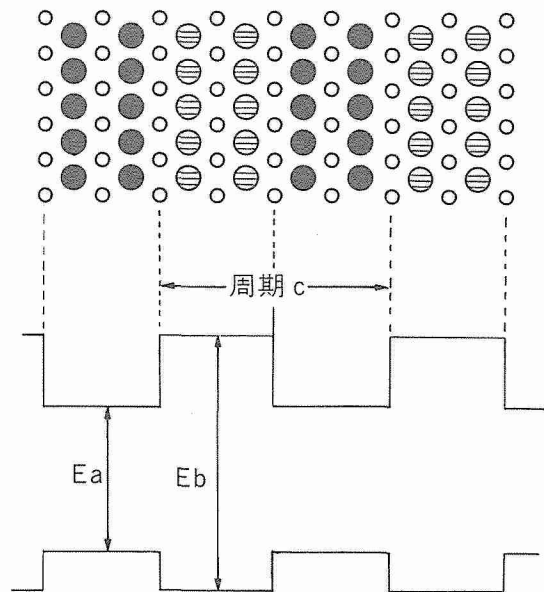
半導体 B (性質 B)



周期 b

禁制帯幅 E_b

新しい半導体 C (性質 C)



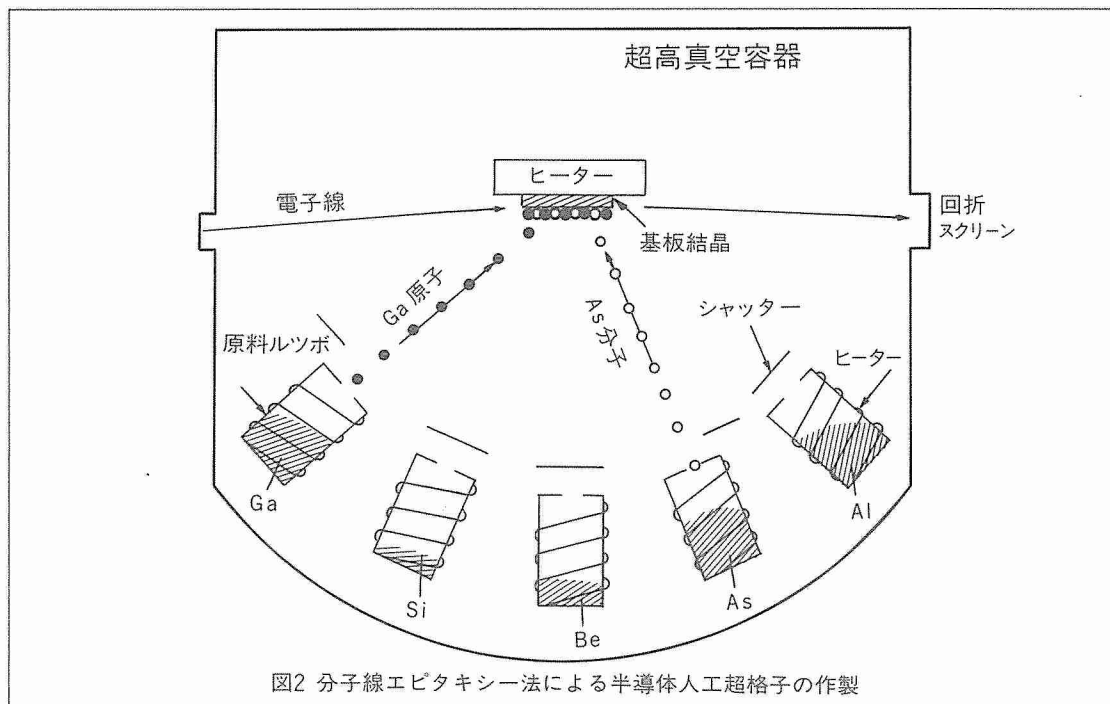
$$(\text{性質 C}) \neq (\text{性質 A}) + (\text{性質 B})$$

図1 半導体人工超格子とそのエネルギーバンド (たとえば●Ga原子, ○As原子, ⊗Al原子)

ルギー幅 E_a, E_b を原子配列に対応してつなぎ合わせた形となります。半導体人工超格子 C は先の a や b より長い周期 c を持つ新しい結晶であり、その性質 C は元の半導体の性質 A でも性質 B でも、また単に

それらの層厚に応じた和でもありません。ですから人工超格子 C は、人間が作った新しい半導体材料と言うことができます。

半導体人工超格子を作るには、原子の並べ方を高



精度に制御できる結晶成長法が用いられます。私達の用いている分子線エピタキシー (Molecular Beam Epitaxy) 法(図2)では、 10^{-10} Torr以下という宇宙空間並の超高真空容器の中でGa, As, Alなどの原料を加熱し、種となる基板結晶 (GaAs) に向けて分子線を当てることにより結晶成長を行います。原料ルツボと基板結晶との間にはシャッターがあり、その開閉によって基板結晶に到着する原子・分子の種類と量を制御します。

たとえばAsのシャッターを開けたままで初めにGaのシャッターを開、Alのシャッターを閉にすると、基板表面にはGa原子とAs分子が到着し、それらが規則的に並んで基板と同じGaAsの結晶格子を作ります。次にGaのシャッターを閉、Alのシャッターを開にすると、今度はAl原子とAs分子が成長表面に到着してAlAsの結晶格子が先のGaAs結晶格子の上で成長します。成長中の基板には横から電子線を当

て、回折パターンを観測します。その回折強度の変化と同期してシャッターの開閉動作を行うことにより、1原子層の精度で望みのGaAs/AlAs人工超格子を作ったり、その中の特定の領域にSi(シリコン), Be(ベリリウム)などの母体とは異なる原子(不純物原子)を添加したりすることができるのです。

3 選択ドーピング構造による発光の高速・高効率化

半導体内の電気の運び手(キャリア)である電子とホール(正孔)が出会うと一定の割合で消滅(再結合)します。このときエネルギーを光の形で放出する場合(発光再結合)と熱の形で放出する場合(非発光再結合)があります。GaAsのような半導体は発光再結合の効率が非常に高いので、半導体レーザーや発光ダイオードの発光層に用いられています。

発光(自然発光)のスピードを高速化するために、SiやBeなどの不純物原子を添加してキャリア

密度を増加させる方法があります。しかし発光層にある限度以上に不純物原子を添加すると、発光の高速化は進んでも強度(発光効率)自体が低下してしまいます。GaAs半導体に不純物としてSiを添加する場合は電子密度 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ が限界です。これはSi添加によって発光層内に非発光再結合を引き起こすエネルギー準位(非発光再結合中心)が生成されるためと考えられます。より高速で高効率な発光を得るためには、非発光再結合中心をできるだけ避けながら発光層の電子を増やすという特別の工夫が必要になります。

半導体人工超格子の中で、発光層の両側を電子に対するエネルギーがより高い層(障壁層)ではさんだエネルギーの井戸(図3)を量子井戸と言います。量子井戸では電子とホールは離散的なエネルギー準位(E_{c1} , E_{c2} , E_{v1} , E_{v2} などでサブバンドとも言う)しかとることができません。そして伝導帯の電子と

価電子帯のホールが発光再結合することにより(図3(a)の $E_{c1} \rightarrow E_{v1}$)、光が生じます。さらにキャリアを発生させるための不純物原子を量子井戸の障壁層の中だけに添加し、発光層には添加しない構造を選択ドープ構造と呼びます。

GaAs発光層をAlGaAs(またはAlAs)障壁層ではさみ、Si不純物原子を障壁層の中だけに添加した選択ドープ構造では、障壁層内のSi不純物原子から生じた電子は障壁層の伝導帯 E_c よりポテンシャルの低いサブバンド E_{c1} に移動します。そのために発光層には高速発光に必要な電子が蓄積されます。一方でSi不純物原子は発光層内にはないので、Si不純物原子に伴う非発光再結合中心は障壁層内には存在しても直接発光層内に形成されることがありません。この場合選択ドープ構造は電子を動かして発光層に集め、障壁層内で動けない非発光再結合中心と空間

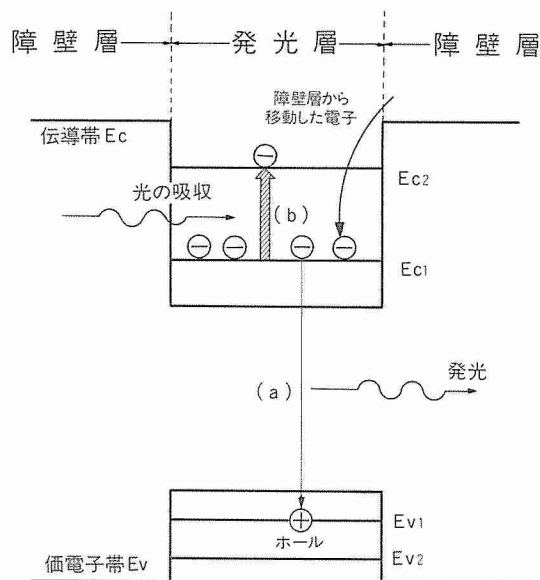
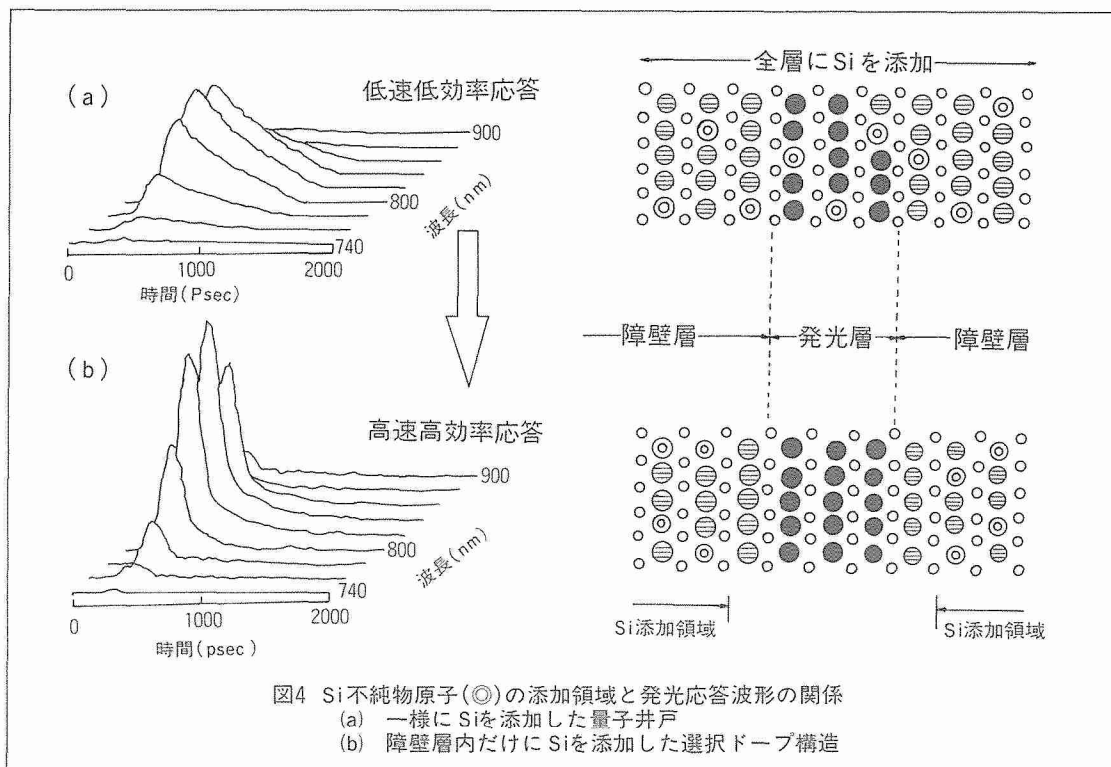


図3 量子井戸のエネルギーバンドとキャリアの遷移過程
(a) 電子とホールの発光再結合過程
(b) 電子のサブバンド間吸収遷移過程



的に分離することにより発光過程への悪影響を減らすという作用をしています。

実際に作製した選択ドーピング構造の試料にパルスレーザー光を当てて発光応答を調べてみると、Si添加量の増加と共に応答時間が短くなり(高速化)、発光層にも一様にSi不純物原子を添加した試料に比べて出力も高いこと(高効率化) [2] が示されています(図4)。発光の高速時間分解・波長分解測定からキャリア再結合の不純物原子添加量、添加領域、障壁層厚などの構造依存性がわかってきました[3]。

Si原子濃度が 10^{19}cm^{-3} 以上の領域では、障壁層でのキャリアの不活性化、非発光再結合中心の障壁層から障壁層・発光層界面への拡散などの問題[4]があります。また高濃度に添加された不純物原子が結晶格子内に占める位置や結晶欠陥との複合体の形成など、

結晶材料自体の問題が重要になってきます[5]。この領域で選択ドーピング構造発光素子の特性を向上するためには、障壁層として別の人工超格子を用いるなどの構造最適化と共に、こうした結晶材料自体の問題を踏まえた新しい成長法の研究が必要と思われます。

4 並列非線形素子への応用

多次元情報の並列処理が可能な光論理演算・非線形処理素子の実現のためには、屈折率や吸収係数などの光学係数が強い非線形性を示す材料の探索が不可欠です。半導体の光学非線形性を強める工夫が色々と試みられていますが、半導体人工超格子のサブバンド間遷移過程の利用もそのひとつです。

量子井戸の伝導帯側の2つのサブバンドの間(図3(b)の $(Ec1 \rightarrow Ec2)$)で電子のエネルギー遷移(たとえ

は吸収遷移)を起こす過程をサブバンド間遷移過程と言います。サブバンド間遷移はこれまで調べられてきた伝導帯・価電子帯間の遷移(3で述べた発光再結合など)と違って同じ伝導帯内の遷移のために応答速度が速く(10^{-12} 秒以下)、強い光学非線形性が予想されるので応用上有望な過程です。私達はフーリエ変換赤外分光計を用いて量子井戸のサブバンド間吸収遷移を測定し、その構造依存性を調べています。また、さまざまな非線形動作を行なわせるために吸収量の外部光による制御を試みています〔6〕。伝導帯側の量子井戸という人工超格子の基本構造で発光・受光や非線形光処理の多くの回路要素を網羅できる可能性があり、今後の発展が期待されています。

5 むすび

半導体人工超格子と、それを用いた選択ドープ構造、サブバンド間遷移の研究を紹介しました。現在より百倍以上の速さで光信号を受け渡しする発光・受光素子、信号の判別、演算、記憶を並列に実行する光多値安定素子、論理演算・非線形処理素子などの可能性がより広い波長領域で芽生えてきており、これまでのシステムが苦手としていたより知的な機能(特徴点の抽出、画像認識・並列処理、連想記憶など)の光による実現が期待されています。

これらの新しい可能性の基盤には、原子層精度の結晶成長と評価技術、超格子のエネルギーや非線形ダイナミクス計算などの地道な発展があります。実際のシステムに使えるようにするためには、2次元、3次元の集積化といったプロセス技術、知的機能を加えた情報処理アルゴリズムの研究がさらに必要と思われる。ATR光電波通信研究所ではこれらのグループが互いに検討を重ねながら、次世代の通信システム用光素子の研究を進めています。

参 考 文 献

- 〔1〕 日本物理学会編：「半導体超格子の物理と応用」培風館(1984)
- 〔2〕 N.Kamata, H.Tsuchiya, K.Kobayashi and T.Suzuki: "Effect of Selective Doping on the Emission Characteristics of a Heavily Si-Doped GaAs/AlGaAs Quantum Well", Jap. J.Appl. Phys. 26, L1082(1987)
- 〔3〕 鎌田、片浜、小林、鈴木：「Si選択ドープ GaAs/AlGaAs量子井戸の発光特性」応用物理 57, 216(1988)
- 〔4〕 H.Katahama, H.Tsuchiya, Y.Shakuda, N. Kamata, K.Kobayashi and T.Suzuki: "Band and Deep Emission and Their Recombination processes in a Heavily Si Doped GaAs/AlGaAs Quantum Well", Int'l Conf. on Superlattices, Microstructures and Microdevices, Trieste (1988.8)
- 〔5〕 I.Fujimoto, N.Kamata, K.Nakanishi, H. Katahama, Y.Shakuda, K.Kobayashi and T.Suzuki: "Behavior of Heavily Doped Si Atoms in MBE Grown GaAs Revealed by X-Ray Quasi-Forbidden Reflection (XFR) Method and Photoluminescence Measurement", Int'l Symp. on GaAs and Related Compounds, Crete (1987.9)
- 〔6〕 尺田、片浜、土屋、鎌田：「外部光による量子井戸サブバンド間吸収変化」応用物理学会講演会(1988.10)